引用格式：丁德文, 索安宁. 现代海洋牧场建设的人工生态系统理论思考. 中国科学院院刊, 2022, 37(9): 1335-1346.
Ding D W, Suo A N. Theoretical thinking of artificial ecosystem for modern marine ranching. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(9): 1335-1346. (in Chinese)

现代海洋牧场建设的人工生态系统理论思考

丁德文　索安宁*
1 中国科学院南海海洋研究所 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室 广州 510301
2 南方海洋科学与工程广东省实验室（广州） 广州 511458

摘要　文章在系统总结国内外海洋牧场概念演进过程及其实践发展历程的基础上，提出现代海洋牧场建设存在生态学理论缺失、生态工程技术缺少、生态管理缺位问题。以问题为导向提出海洋牧场人工生态系统概念，并从海洋牧场渔业资源关键功能群构造及其生境营造角度，全面剖析了海洋牧场人工生态系统的结构原理。最后探讨了海洋牧场人工生态系统构筑的基本范式，包括海洋牧场人工生态系统方案规划设计、生态工程与智能工程建设、生态适应性管理模式建立等，以期为我国现代海洋牧场建设探索生态学理论体系。

关键词　现代海洋牧场，人工生态系统，理论框架，渔业资源关键功能群，生境营造

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20210518003

海洋渔业资源是长期以来一直是人类优质蛋白摄食的“蓝色粮仓”，为人类社会发展提供了源源不断的水产食品[1,2]。近 50 年以来，随着我国近岸海域渔业资源过度捕捞，以及伴随的海洋环境污染、生境破坏等问题，导致我国海洋渔业资源明显衰退[3]。为满足人民群众日益增长的海洋水产品需求，以鱼虾类、贝蟹类、海珍品等为主要对象的海水养殖产业异军突起，成为海洋水产蛋白的主要供给源。这种传统的海水养殖产业因海水环境污染、养殖生物病害频发、养殖产品质量下滑等原因已难以适应我国经济社会持续发展和海洋生态环境保护的要求。在此背景下，海洋牧场以一种全新的海洋渔业生产模式被国内外广泛关注，成为我国海洋渔业产业转型升级和新旧动能转换的重要取向[4,5]。然而，现代海洋牧场多从海洋养殖生物学角度出发建设，缺乏对海洋牧场生态系统的整体考虑，理论体系不甚健全。本文基于此提出海洋牧场

*通信作者
资助项目：南方海洋科学与工程广东省实验室（广州）人才团队引进重大专项（GML2019ZD0402），中国科学院南海生态环境工程创新研究院课题（ISEE2019ZR0），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA13020401）
修改稿收到日期：2022年8月5日

人工生态系统理论框架及其构筑范式，为现代海洋牧场建设探索生态学理论依据。

1 海洋牧场理念发展历程及其存在的主要问题

1.1 海洋牧场概念演进过程

（1）国际海洋牧场理念演进发展。海洋的“牧场理念”最早可追溯到20世纪初美国、英国等工业化国家的“海洋牧场”（Marine Ranching）运动[6]。20世纪70年代以来，日本学者对海洋牧场概念进行了长期的探索，1971年，日本水产厅海洋会议文件指出“海洋牧场是未来渔业的基本技术体系，可以从海洋生物资源中持续生产食物”[7]。1991年，日本学者中村充[7]将海洋牧场定义为：“在广阔的沿岸和近海海域中，在控制鱼类、贝类等渔业物种行为的同时，对其从出生到捕获进行管理的渔业系统”。1993年，日本学者三桥宏次[8]将海洋牧场定义为：“以保证人工放流后的海洋生物幼体更好地成长为目标，在自然海域利用生境模拟技术人工营造的种苗培育场”。韩国《养殖渔业育成法》将海洋牧场定义为：“在一定海域综合设置水产资源养护的设施，人工繁殖和采捕水产资源的场所”[9]。

（2）我国海洋牧场理念演进发展。我国海洋牧场理念可追溯到1947年朱树屏提出“水即是鱼类的牧场”。1965年，曾呈奎和毛汉礼提出“使海洋成为种植藻类和贝类的农场，养鱼、虾的牧场，达到耕海目的”理念；曾呈奎等[10,11]将海洋农牧化定义为“通过人为的干涉改造海洋环境，以创造经济生物生长发育所需要的海洋环境条件，同时，也对生物本身进行必要的改造，以提高它们的质量和产量”。21世纪以来，我国海洋牧场概念逐渐形成，张国胜等[4]和阙华勇等[12]最早将海洋牧场定义为在一定的海域内，通过采用人工培育、增殖和放流的方法，将生物种苗人工驯化后放流入海，利用海洋自然的微生物饵料和微量投饵养育，并且运用先进的鱼群控制技术和环境检测技术对其进行科学的管理，从而达到增加海洋渔业资源，进行高效率捕捞活动的目的。杨红生[13]将海洋牧场定义为基于海洋生态学原理和现代海洋工程技术，充分利用自然生产力，在特定海域科学培育和管理渔业资源而形成的人工渔场。《海洋牧场分类》（SC/T9111—2017）将海洋牧场定义为基于海洋生态系统原理，在特定海域，通过人工鱼礁、增殖放流等措施，构建或修复海洋生物繁殖、生长、索饵或避敌所需的场所，增殖养护渔业资源，改善海域生态环境，实现渔业资源可持续利用的渔业模式。国家自然科学基金委员会2019年第230期双清论坛，指出海洋牧场是基于生态学原理，充分利用自然生产力，运用现代工程技术和管理模式，通过生境修复和人工增殖，在适宜海域构建的兼具环境保护、资源养护和渔业持续产出功能的生态系统。2022年发布的《海洋牧场建设技术指南》国家标准将海洋牧场定义为：“基于海洋生态系统原理，在特定海域，通过人工渔礁、增殖放流等措施，构建或修复海洋生物繁殖、生长、索饵或避敌所需的场所，增殖养护渔业资源，改善海域生态环境，实现渔业资源可持续利用的渔业模式”。

截至目前，国内外学者就海洋牧场还未形成统一的定义，然而，海洋牧场建设的几个关键要点已逐渐明晰：① 海洋牧场是在自然海域中人为干预或控制的渔业生产生态系统；② 海洋牧场建设的主要目的是增殖养护渔业资源，改善海洋生态环境，实现海洋渔业资源的持续产出；③ 海洋牧场建设的目标是构建或修复海洋经济鱼类功能群及其赖以繁殖、生长、索饵、避害的栖息生境；④ 海洋牧场建设必须依据生态学原理，尤其是依据建设区域的海洋生态系统生态学特征。

1.2 海洋牧场实践发展历程

（1）国际海洋牧场实践发展历程。国外海洋牧场建设起始于20世纪70年代末的人工渔礁投放和鱼

苗增殖放流。1968 年美国制定了“海洋牧场建设计划”，1974 年在加利福尼亚建成了集海上观光、休闲垂钓为一体的休闲型海洋牧场，取得了较好的设生态与经济效益[6]。日本 1971 年提出海洋牧场建设构想，并建成了世界上第一个真正意义上的海洋牧场——日本黑潮牧场；20 世纪 90 年代，在宫城气仙湾等海域建设音响海洋牧场，用音响控制鱼类行为；21 世纪以来，日本海洋牧场建设开始向深远海拓展，并注重采用新技术修复渔业生态环境、养护渔业生物资源[7]。韩国 1998 年在统营山阳邑三德里和美南里海域建设面积约 20 km^{2}的“海洋牧场”计划，并将海洋牧场建设经验向其他 4 个海洋牧场推广。为加快海洋牧场计划实施，韩国政府制定了未来 30 年海洋牧场建设的“三步走”战略，全面推进海洋牧场建设[8]。

（2）我国海洋牧场实践发展历程。我国海洋牧场建设经历了技术实验期、推进期和快速发展期 3 个时期[14]。1979 年，我国首次在广西钦州沿海投放了 26 座试验性小型单体人工鱼礁，20 世纪 80 年代开始，在黄渤海和东海开展对虾的增殖放流试验，我国海洋牧场建设进入技术实验期[15]。技术实验期海洋牧场建设以农牧化、工程化为主要特征，以提高水产品产量为主要目的，海洋牧场建设主要内容是人工渔礁生境营造和增殖放流，技术与装备水平低，灾害防御能力弱。从 2006 年国务院发布《中国水生生物资源养护行动纲要》到 2015 年农业部创建国家级海洋牧场示范区之前为海洋牧场建设推进期，该时期共建设人工鱼礁 6.094×10^7 m^2，形成了海洋牧场 852.6 km^2 [14]，海洋牧场建设以生态化、信息化为主要特征，以提供优质、安全、健康的水产品，改善国民营养与膳食结构为主要目标，更加重视生态环境保护和生物资源养护，技术创新显著增强。2015 年，农业部组织开展国家级海洋牧场示范区创建以来，我国海洋牧场建设进入加速发展期，海洋牧场建设以数字化、体系化为特征，以建设功能多样、多产融合现代海洋牧场为目标，注重核心技术突破、场景空间拓展、发展模式创新。截至 2021 年底，农业农村部已批准建设覆盖渤海、黄海、东海与南海四大海域的 153 个国家级海洋牧场示范区，并计划到 2025 年建设 200 个国家级海洋牧场示范区，以引领全国海洋牧场建设全面推进[16]。

1.3 现代海洋牧场建设存在的主要问题

（1）生态学理论缺失。自然海洋渔场是指鱼类或其他水生经济动物随产卵繁殖、索饵育肥或越冬适温等对环境条件要求的变化，在一定季节聚集成群密集经过或滞留于一定海洋水域范围而形成在渔业生产上具有捕捞价值的相对集中场所[17]。自然海洋渔场是一个以大型经济鱼类为顶级捕食者，由各种食物链连接的渔业资源功能群及其“三场一通道”生境构成的开放性海洋生态系统。在这个海洋生态系统中存在着物种与物种、物种与生境、生境与生境之间复杂密切的能量流、物质流、信息流等相互作用与反作用机制。由于缺少生态位理论、功能群理论、食物链能量流理论等海洋牧场生态学理论引导，当前我国海洋牧场建设主要有以下欠缺。① 海洋牧场渔业经济物种种类单一。北方海洋牧场增殖放流种类主要有海参、鲍鱼等海珍品及牙鲆、舌鳎等不到 10 种，南方海洋牧场增殖放流种类主要有鲷鱼类、石斑鱼类、马鲛鱼类等 [18]。这种单一物种的增殖放流难以形成互利共生、分层利用、多级利用的海洋牧场生态系统结构，增加病害风险，降低资源利用效率，影响海洋牧场的整体稳定性。② 缺乏对海洋牧场渔业经济物种食物链的培育。海洋牧场建设主要以渔业物种幼苗放流为主，很少考虑放流渔业生物的食物链培育，导致放流幼苗因缺乏持续供给的食物而难以大量成活，降低海洋牧场建设成效。③ 缺少对海洋牧场“三场一通道”生境体系的针对性营造。海洋牧场人工鱼礁设计和建设很少考虑各类放流苗种对生境条件的喜好，以及索饵场、产卵场、越冬场等功能性生境场所的针对性、差异化营造，目标泛化，难以满足放流苗种在不同生命周期阶

段对生境的差异化需求[19,20]。

（2）海洋生态工程技术缺少。现代海洋牧场是充分利用海洋自然生产力，运用现代工程技术，通过生境修复和人工增殖，在适宜海域构建的渔业生态系统[21]。海洋工程技术是现代海洋牧场建设的核心技术，也是现代海洋牧场建设的基本途径。目前，我国海洋牧场建设主要集中在鱼苗增殖放流和人工鱼礁投放，涉及的海洋工程技术主要为增殖放流苗种繁殖与培育技术、人工鱼礁浇筑与投放技术等少量生物与工程技术，缺少现代海洋牧场建设的海洋生态工程技术系统[14]，主要体现在：① 渔业资源养护工程技术。包括增殖放流鱼苗训练（驯化）技术、环境适应技术，渔业资源原位增殖技术、敌害防御技术、病害防治技术等。② 生境营造工程技术。包括渔业资源经济物种索饵场、产卵场、越冬场等功能性生境场所仿生营造技术，洄游通道贯通技术等。③ 海洋牧场动态管控工程技术。包括渔业资源水下精准监控与资源评估技术、海水环境自动监测与灾害风险预警技术、水下机器人自动巡查技术等。④ 渔业资源选择性采捕工程技术。包括中上层鱼类选择性采捕技术、渔礁区底层渔业资源采捕技术、底栖渔业资源采捕技术等。

（3）生态管理缺位。管理是实现海洋牧场健康稳定运行和渔业资源持续产出的基本途径,是提高海洋牧场生产能力的重要方法。目前，我国海洋牧场建设涉及的管理内容很少。管理者缺乏对海洋牧场生态系统结构、功能的监测分析、评价及认知，海洋牧场生态管理缺位。主要表现在：① 海洋牧场选址规划缺少科学的评估方法与规划技术。海洋牧场选址区域多为建设方或渔业管理部门指定，海洋牧场建设面积随投资而定，没有科学依据。② 海洋牧场运营过程缺少实时监控、监测设备。由于海洋牧场水下环境复杂多变，缺少水下实时监控设备，管理者就无法及时了解海洋牧场水下渔业资源及环境状况并及时作出应急决策。③ 海洋牧场建设缺乏效果评估指标体系与技术方法。缺乏客观全面的海洋牧场建设效果评估技术方法，管理者无法对海洋牧场建设效果有全面准确的认知和评估。④ 海洋牧场建设缺乏适应性管理方案制定。海洋牧场管理者对于海洋牧场管理要素和管理技术方案认知模糊，管理工作难以到位。⑤ 海洋牧场管理主体多样，管理标准不一。北方海洋牧场多以海珍品增殖为主要目标，经营管理主体多为企业；南方海洋牧场多以渔业资源养护为主，经营管理主体多为渔业行政部门或下属单位，由于渔业资源养护型海洋牧场盈利性较差，经营管理主体积极性不高，海洋牧场建设迟缓。

总体上，我国海洋牧场建设仍以增殖放流和人工鱼礁建设为主，很少有从生态学角度考虑，建设和营造海洋牧场生态系统。这种做法不仅忽略了增殖放流渔业生物幼苗的食物链，也人为割裂了增殖放流物种与人工鱼礁环境之间的生态位联系，使得海洋牧场建设成为简单的“增殖放流+人工鱼礁”工程，难以实现国家推动海洋牧场建设的渔业资源增殖、渔业生态环境修复、海洋生态系统服务功能提升等多重目标。

2 海洋牧场人工生态系统概念及其基本结构

2.1 海洋牧场人工生态系统概念内涵

海洋牧场不仅是一种海洋生态系统，更是一种以人为主导的海洋人工生态系统，即海洋牧场人工生态系统[22]。这里所说的海洋牧场人工生态系统是基于生态系统生态学原理，在自然海域中通过生态工程技术，构造的以渔业资源关键功能群及其“三场一通道”生境体系为核心的海洋生态系统，并辅以生态系统适应性管理模式，以实现渔业资源的持续高效产出、海洋生态保护及资源养护的一种海洋渔业生产模式。海洋牧场人工生态系统不同于传统海洋牧场，它是从生态系统生态学角度构建的多种渔业资源关键功能群及其“三场一通道”生境体系相耦合并受人类控制的人工生态系统。它不仅实现了海洋牧场生态空间

的分层多级集约利用，有利于提升海洋牧场的渔业生产功能，而且还具有生态调控、资源养护、休闲娱乐等其他生态系统服务功能。

海洋牧场人工生态系统在狭义上主要指人类主导下的海洋牧场渔业资源关键功能群与人工营造的“三场一通道”生境体系相互适应耦合形成的具有渔业生产、资源养护、生态修复等功能的海洋生态系统。海洋牧场人工生态系统在广义上指海洋牧场生态系统与人类社会共同组成的复合生态系统。在海洋牧场人工生态系统中，一方面，人类是海洋牧场的建设者，通过物种驯化、群落构造、生境营造、环境适应等工程技术构造海洋牧场人工生态系统，并通过生态监测、适应性管理等技术信息手段控制海洋牧场人工生态系统的演进过程；另一方面，人类也处于海洋牧场人工生态系统食物链的最顶端，是海洋牧场人工生态系统的最终消费者，也是海洋牧场人工生态系统物质流、能量流的最终归宿。

2.2 海洋牧场人工生态系统的组成结构

*广义的海洋牧场人工生态系统是以人类为主导，以社会环境为背景，以自然环境为基础的复杂系统。*自然环境是海洋牧场人工生态系统构建的基本依托，包括生物因素和生境因素，生物因素为海洋牧场顶级经济生物及其食物链各营养级饵料生物，主要是各类浮游植物、浮游动物和小型游泳动物，它们是海洋牧场物质与能量的最直接来源；生境因素是海洋牧场建设海域具有的最基本生存环境条件，包括底质类型、水深地形状况、水文环境等。社会环境是海洋牧场人工生态系统构建和维持的思想、技术、资本、制度等基本来源，包括技术环境、经济环境、法规制度环境等，技术环境是海洋牧场人工生态系统建设的技术支撑来源，经济环境是海洋牧场人工生态系统建设的产业需求和利益诉求，法规制度环境是海洋牧场人工生态系统建设制度保障[23]。

*狭义的海洋牧场人工生态系统是由若干渔业资源关键功能群及其生境环境构成。*这里的渔业资源关键功能群是指在海洋牧场人工生态系统中，发挥着渔业资源关键功能的海洋经济生物类群，包括顶级经济生物及其由食物链链接的各营养级生物类群[24]。生境环境指渔业资源关键功能群赖以生存、生长、繁衍的各种生境场所，包括产卵场、孵幼场、索饵场、育肥场、越冬场、洄游通道等各种场所。在自然海洋生态系统中，不同渔业资源关键功能群在长期的竞争、适应、进化等生态作用下形成各自不同的营养等级和生境体系，即生态位。

2.3 海洋牧场人工生态系统的空间结构

在海洋牧场人工生态系统中，不同渔业资源关键功能群利用不同的生态位空间，具有不同的产卵场、孵幼场、索饵场等生境场所。*① 在垂直方向上。*有些渔业资源关键功能群利用海洋水体表层生态空间，有些渔业资源关键功能群利用海洋水体底层生态空间，还有些渔业资源功能群利用海洋水体中层生态空间。*② 在水平方向上。*有些渔业资源关键功能群喜好河口咸淡水混合区域，有些渔业资源关键功能群喜好海湾浅水区域，有些渔业资源关键功能群喜好深水海域。多种渔业资源关键功能群通过各种信息流分区分层集约利用海洋牧场生态空间，并在人为控制下在各自的“三场一通道”生境场所之间迁徙洄游，繁殖生长，实现渔业资源的持续高效产出（图 1）。

3 海洋牧场人工生态系统构筑的基本范式

海洋牧场人工生态系统构筑应该从生态系统生态学角度，在深入剖析主要渔业资源关键功能群生态过程与它们对应的“三场一通道”生境空间格局耦合机制的基础上，研究设计海洋牧场人工生态系统基本方案，运用生态工程和系统工程方法，建设渔业资源关键功能群及其赖以生存繁衍的生境场所以及其他设施，并辅以生态适应性管理模式，才能实现海洋牧场

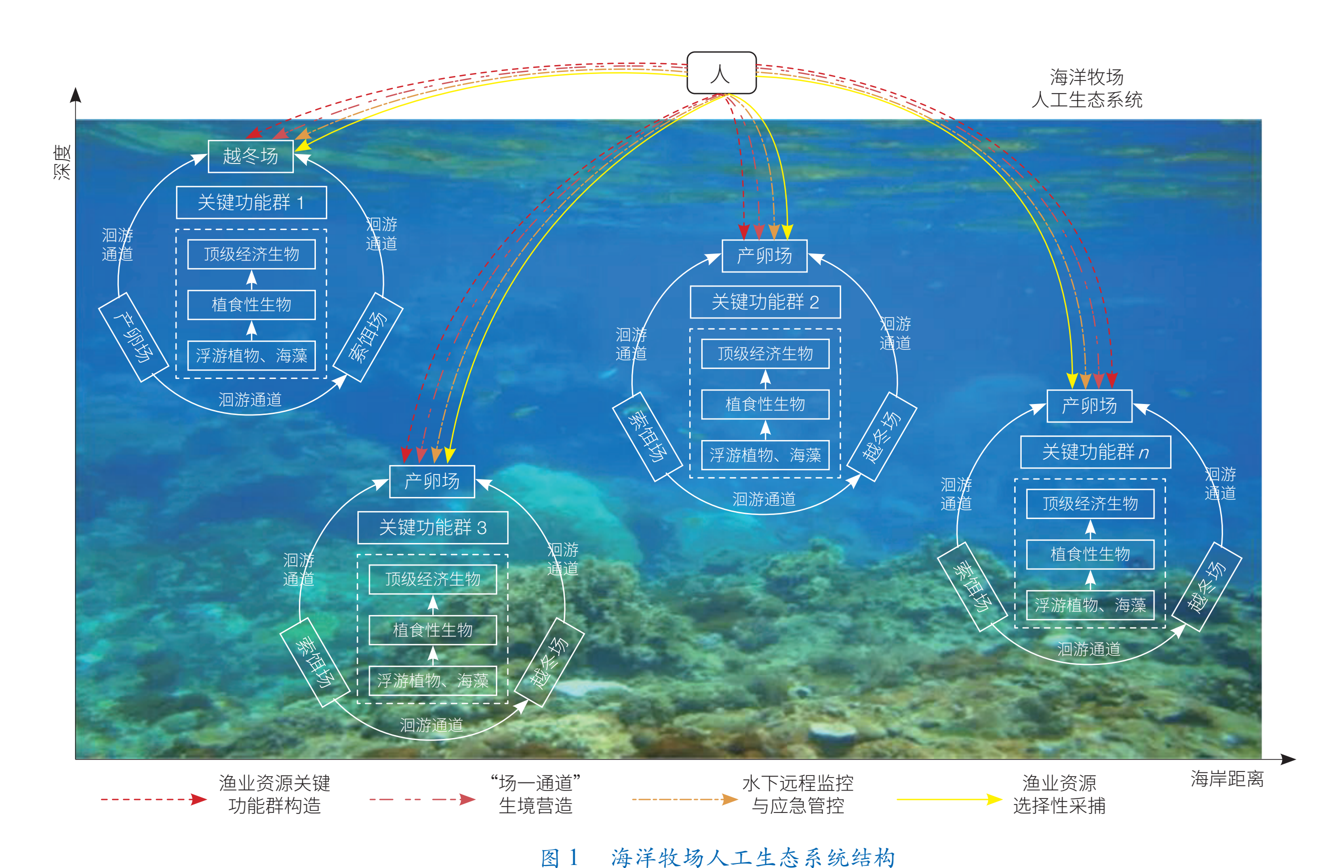


图 1　海洋牧场人工生态系统结构

Figure 1　Structure of marine ranching artificial ecosystem

人工生态系统的稳定持续高效运转。

3.1 海洋牧场人工生态系统设计

海洋牧场人工生态系统设计是海洋牧场建设的前提和基础，包括海洋牧场建设场址优选、选址区域海洋生态系统调查分析与研究、渔业资源关键功能群的遴选、生境营造规划及海洋牧场人工生态系统整体设计等。① 海洋牧场建设场址优选。海洋牧场建设场址应优先选取天然渔场或历史天然渔场，这些区域一般饵料生物丰富、生境条件优越，相对来说建设成本低，建设成效好。② 选址区域海洋生态系统调查分析与研究。对选址区域自然海洋生态系统开展全面调查，包括底质类型与海底地形、水文动力环境、水质环境、渔业资源及饵料生物等。必要时，搜集选址区域历史海洋调查资料，全面分析选址区域海洋经济生物种类组成结构，生物量与渔获量结构。研究主要渔业资源经济生物种的食物链和食物网，以及它们的索饵场、产卵场、越冬场等生境环境条件，剖析选址区域自然海洋生态系统物质流、能量流、信息流等结构特点以及主要生态功能[25]。③ 渔业资源关键功能群遴选。根据选址区域主要渔业资源经济生物种类特点，选取那些体型大、肉质鲜美、能够人工扩繁驯化且已增殖放流成功的渔业资源经济生物种类，作为渔业资源关键功能群的顶级经济生物种类，并进一步研究它们的食物链营养级其他生物类群[24]。根据生物多样性与生产力复杂耦合关系[26]，一般海洋牧场遴选设计具有不同生态位特点的4—6个渔业资源关键功能群就足以实现渔业资源的高效产出。④ 生境营造规划。根据不同渔业资源关键功能群对索饵场、产卵场、越冬场等生境环境喜好的差异性，编制主要渔业资源关键功能群各类生境场所详细参数表，结合海洋牧场选取区域的实际生境环境条件，规划海洋牧场生境营造空间布局，设计主要渔业资源关键功能群生境营造详细方

案[19]。⑤ 海洋牧场人工生态系统整理设计。根据各渔业资源关键功能群食物链与营养级特征[27]，测算海洋牧场人工生态系统渔业资源承载能力，设计海洋牧场人工生态系统的平面结构、垂直结构、群落及营养结构、景观结构等，谋划海洋牧场人工生态系统的物质流、能量流、信息流的人为技术控制过程，以及渔业生产功能、资源养护功能、生态调控功能、社会文化功能的呈现次序与方式，编制海洋牧场人工生态系统规划设计方案。

3.2 海洋牧场生态工程建设

以海洋牧场人工生态系统规划设计方案为依据，采用生态工程和现代信息工程技术营造海洋牧场人工生态系统。海洋牧场生态工程建设主要包括渔业资源关键功能群构造工程、“三场一通道”生境体系营造工程、海洋经济物种人工驯化与环境适应工程、生态系统监测工程、病害防御工程、风险防范工程以及生态系统运维工程。① 渔业资源关键功能群构造工程。渔业资源关键功能群构造工程主要包括海洋牧场渔业资源关键功能群经济物种的人工繁殖、幼苗培育、环境适应等生物工程技术，这里的经济物种包括渔业资源顶级经济物种及其饵料动植物物种。一些渔业资源关键功能群经济物种目前已有成熟的人工繁殖、幼苗培育技术；还有一些渔业资源关键功能群经济物种的人工繁殖、幼苗培育技术并不成熟，需要在海洋牧场建设过程中不断研究完善改进。② 生境营造工程。生境营造工程主要是营造渔业资源关键功能群所需的“三场一通道”生境体系。生境营造工程需要针对不同渔业资源关键功能群对各种生境环境的喜好特点及相关参数，研究构筑不同材质、不同结构、不同规格的人工鱼礁构件，并将其置于不同位置的海洋牧场空间，作为不同渔业资源关键功能群的索饵场、产卵场、越冬场等，并疏通各个生境场所之间的洄游通道，便于顶级经济生物在不同生长发育阶段往来洄游[28,29]。另外，也可根据海洋牧场建设区域特点和渔业资源关键功能群生境喜好，修复或恢复珊瑚礁、海草床、海藻场等作为海洋牧场关键功能群的产卵场、索饵场、育肥场等生境场所。③ 人工驯化与环境适应工程。海洋牧场是在自然开放海域中构筑的人工生态系统，必须采取行为驯化控制工程让渔业资源关键功能群聚集在海洋牧场空间范围内。行为驯化控制工程是渔业资源关键功能群人工控制的一项新技术，有音响驯化、饵料驯化、光照驯化等技术。通过幼苗人工驯化形成顶级经济物种在海洋牧场空间范围内的迁徙洄游完成生命周期过程的行为习惯，以便于人工监测、调控、采捕。环境适应主要是指人工培育的生物幼苗在“人工环境→半人工环境→自然海域环境”的逐渐适应过程。④ 生态系统监控工程。生态系统监控工程包括海洋牧场环境监控工程、生物监控工程、生态过程监控工程等。环境监控工程主要建设海洋牧场水质、水流、水色、温度、盐度、溶解氧等环境指标远程自动监测与调控装置，开发监测数据自动分析评价预警技术体系；生物监控工程主要建设海洋牧场渔业资源关键功能群远程视频监控体系，实现对渔业资源关键功能群顶级经济物种及其各级饵料生物的生长发育、饵料供给全过程监测、评价与问题预警；生态过程监控工程主要建设渔业资源关键功能群索饵、育肥、产卵、育幼、越冬等生命周期全过程监控体系，了解渔业资源关键功能群的生命周期各阶段在“三场一通道”生境场所之间的洄游迁徙、原位增殖的群落繁衍过程。⑤ 病害防御工程。病害是水产品人工养殖面临的主要问题，海洋牧场人工生态系统可能同样存在鱼类病害问题。可采取病害生态防御工程、病害生物防御工程、病害药物防御工程等多种措施防止海洋牧场人工生态系统病害发生。病害生态防御工程是在海洋牧场人工生态系统中增添适量肉食性捕食鱼类，能快速将患病鱼苗捕食，防止疾病传播；病害生物防御工程是对海洋牧场经济生物投放病害生物疫苗等，提高经济生物的病害抵抗能力；病害药物防御工程在

病害发生前向海洋牧场投放病害防御药物，治疗病害经济生物。⑥ 风险防范工程。海洋牧场风险来自各个方面，有台风、海浪、风潮潮等水动力摧毁风险，极端低温、极端高温等环境损害风险，溢油、危化品泄露等污染风险等，需要针对各类风险损害特点，制定针对性的海洋牧场风险防范工程。⑦ 生态系统运维工程。海洋牧场人工生态系统运维工程主要为海洋牧场人工生态系统维持管理和控制提供的各类信息工程与智能管控工程建设，包括音响/光照智能控制工程、渔业资源选择性捕捞工程、电力能源供给工程等，可结合现代远程监控技术、网络信息技术、人工智能技术建设现代智慧海洋牧场人工生态系统。

3.3 海洋牧场生态适应性管理

适应性管理是通过对管理实践结果的不断学习总结，并反馈到管理工作中来持续提高管理实践技术水平的一种新型管理理论模式。适应性管理理论的核心是在管理实践工作中不断学习改进，并反馈到管理实践中持续提高管理技术水平的循环过程[30]。海洋牧场是在自然海域中人工建设和人为控制的人工生态系统，是自然海域中一种新生生态系统，其演进过程包括突现、存在、增长、发展演化几个环节。只有运用适应性管理理论，通过动态监测分析评价海洋牧场人工生态系统演进过程，才能阐述突现是如何发生的，存在的层次性、增长的复杂性、演化的定向性，及时发现问题，及时调整管理技术措施，并反馈到管理实践工作，形成生态适应性管理模式，促进海洋牧场建设达到预期目的[31]。

海洋牧场生态适应性管理的目标是，不断优化海洋牧场人工生态系统结构，控制海洋牧场人工生态系统演进方向及其速度，为经济社会发展提供源源不断的优质水产品及其其他生态服务功能。海洋牧场生态适应性管理包括海洋牧场人工生态系统适应性管理方案制定、海洋牧场人工生态系统适应性管理方案实施、海洋牧场人工生态系统动态监测分析、海洋牧场人工生态系统建设效果评估与问题剖析，海洋牧场人工生态系统管理技术方案改进 5 个主要环节。① 海洋牧场人工生态系统适应性管理方案制定。制定阶段性海洋牧场建设目标，并根据该目标分解确定海洋牧场人工生态系统各渔业资源关键功能群培育及其生境营造的具体衡量标准与参数，深入剖析海洋牧场建设目标与各关键功能群及其生境参数之间的响应关系，构建海洋牧场生态适应性管理模型，制定海洋牧场人工生态系统适应性管理方案。② 海洋牧场人工生态系统适应性管理方案实施。根据海洋牧场建设方案及其建设进展，制定海洋牧场管理细则，实施海洋牧场建设全过程全天候管理，包括海洋牧场人工生态系统规划设计方案实施管理、渔业资源关键功能群构造工程管理、生境营造工程管理、系统运维工程管理以及海洋牧场人工生态系统综合管理。③ 海洋牧场人工生态系统建设效果监测分析。采用水环境自动监测设施、渔业资源关键功能群水下远程监控设施、人员潜水查看方法等多种手段，动态监测海洋牧场人工生态系统结构功能状态参数，分析海洋牧场人工生态系统演进方向、速度态势。④ 海洋牧场人工生态系统建设效果评估与问题分析。构建海洋牧场人工生态系统建设效果评估指标体系与评估方法，比较分析海洋牧场人工生态系统结构功能参数与阶段性目标衡量标准之间的偏差，定量评估海洋牧场人工生态系统建设的实际效果，分析海洋牧场阶段性建设目标达标程度及其存在的主要问题与问题形成原因。⑤ 海洋牧场人工生态系统管理技术方案改进。根据海洋牧场人工生态系统建设效果评估与问题分析结果，有针对性地提出海洋牧场人工生态系统结构优化、功能改善的技术途径和方法，并反馈到海洋牧场人工生态系统适用性管理方案修订工作，改进海洋牧场人工生态系统适应性管理方案，再次实施管理工作。如此不断地经过监测分析→效果评估→技术改进→方案实施→监测分析的环节循环，形成海洋牧场人工生态系统适应性管理模式。

4 结语

现代海洋牧场建设是国家“蓝色粮仓”计划的重要实施途径，但在海洋牧场建设实施过程中，一直缺乏相关的理论指导，尤其是缺乏生态系统理论指导，这导致我国海洋牧场建设成为简单的增殖放流+人工鱼礁投放工程。这种海洋牧场建设模式不仅建设成效不高，而且功能单一，稳定性差，极易受到各种外来风险的左右。本文在深入剖析国内外海洋牧场概念演进与发展实践问题的基础上，提出海洋牧场人工生态系统概念，认为海洋牧场是人主导下的以自然环境为基础，以社会环境为背景的复合生态系统，并勾绘了海洋牧场人工生态系统的基本组成结构和空间利用结构。现代海洋牧场建设应充分发挥人在海洋牧场建设中的主导作用，形成从方案规划设计→生态工程建设→生态适应性管理模式构建的海洋牧场人工生态系统构筑范式，达到海洋牧场渔业资源关键功能群生命周期过程与它们对应的“三场一通道”生境空间格局的有效耦合，实现海洋牧场渔业资源高效养护与持续产出。希望本文提出的海洋牧场人工生态系统理论框架能够为我国现代海洋牧场建设有所裨益，启发新时代现代海洋牧场建设的新模式，提升我国现代海洋牧场建设综合成效。

参考文献

1 Sale P F, Agardy T, Ainsworth C H, et al. Transforming management of tropical coastal seas to cope with challenges of the 21st century. Marine Pollution Bulletin, 2014, 85(1): 8-23.

2 Taylor M D, Chick R C, Lorenzen K, et al. Fisheries enhancement and restoration in a changing world. Fisheries Research, 2017, 186: 407-412.

3 杨红生. 我国蓝色粮仓科技创新的发展思路与实施途径.水产学报, 2019, 43(1): 97-104.
Yang H S. Development ideas and implementation approaches of blue granary scientific and technological innovation in China. Journal of Fisheries in China, 2019, 43(1): 97-104. (in Chinese)

4 张国胜, 陈勇, 张沛东, 等. 中国海域建设海洋牧场的意义及可行性. 大连水产学院学报, 2003, (2): 141-144.
Zhang G S, Chen Y, Zhang P D, et al. Significance and feasibility of establishing marine ranching in Chinese sea area. Journal of Dalian Fisheries University, 2003, (2): 141-144. (in Chinese)

5 Yu J, Zhang L. Evolution of marine ranching policies in China: Review, performance and prospects. Science of the Total Environment, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139782.

6 杨金龙, 吴晓郁, 石国峰, 等. 海洋牧场技术的研究现状和发展趋势. 中国渔业经济, 2004, 22(5): 48-50.
Yang J L, Wu X Y, Shi G F, et al. Overview of marine ranching technology. Chinese Fisheries Economics, 2004, 22(5): 48-50. (in Chinese)

7 刘卓, 杨纪明. 日本海洋牧场（Marine Ranching）研究现状及其进展. 现代渔业信息, 1995, 10(5): 14-18.
Liu Z, Yang J M. The status and progress of marine ranching research in Japan. Modern Fisheries Information, 1995,10(5): 14-18. (in Chinese)

8 Kim S K, Yoon S C, Youn S H, et al. Morphometric changes in the cultured starry flounder, Platichthys stellatus, in open marine ranching areas. Journal of Environmental Biology, 2013, 34: 197-204.

9 Hwang B K, Lee Y W, Jo H S, et al. Visual census and hydro-acoustic survey of demersal fish aggregations in Ulju small scale marine ranching area (MRA), Korea. Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology, 2015, 51(1): 16-25.

10 曾呈奎. 海洋农牧化大有可为. 科技进步与对策, 1985, 3(2): 9-10.
Zeng C K. Marine farming have a brilliant future. Science Technology Progress and Policy, 1985, 3(2): 9-10. (in Chinese)

11 曾呈奎, 徐恭昭. 海洋牧业的理论与实践. 海洋科学, 1981, 5(1): 1-6.
Zeng C K, Xu G Z. The theory and practice of marine animal husbandry. Marine Sciences, 1981, 5(1): 1-6. (in Chinese)

12 阙华勇, 陈勇, 张秀梅, 等. 现代海洋牧场建设的现状与发

展对策. 中国工程科学, 2016, 18(3): 79-84.

Que H Y, Chen Y, Zhang X M, et al. Modern marine ranching: status and development strategy. Strategic Study of CAE, 2016, 18(3): 79-84. (in Chinese)

13 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.

Yang H S. Construction of marine ranching in China: Reviews and prospects. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(7): 1133-1140. (in Chinese)

14 杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考. 2019, 43(4): 1255-1262.

Yang H S, Zhang S Y, Zhang X M, et al. Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(4): 1255-1262. (in Chinese)

15 陈勇. 中国现代化海洋牧场的研究与建设. 大连海洋大学学报, 2020, 35(2): 147-154.

Chen Y. Research and construction of modern marine ranching in China: A review. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(2): 147-154. (in Chinese)

16 杨红生, 丁德文. 海洋牧场3.0：历程、现状与展望. 中国科学院院刊, 2022, 37(5): 1-8.

Yang H S, Ding D W. Marine ranching version 3.0: History, status and prospects. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(5): 1-8. (in Chinese)

17 陈新军. 渔业资源与渔场学. 北京: 海洋出版社, 2004.

Chen X J. Fisheries Resources and Fishery Oceanography. Beijing: Marine Press, 2004. (in Chinese)

18 李波. 关于中国海洋牧场建设的问题研究. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

Li B. A study on China' Marine Ranching Construction. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese)

19 索安宁, 丁德文, 杨金龙, 等. 海洋牧场生境营造“三场一通道”理论应用研究. 海洋渔业, 2022, 44(1): 1-8.

Suo A N, Ding D W, Yang J L, et al. Application analysis of “three fields and one channel” theory in marine ranching habitat construction. Marine Fisheries, 2022, 44(1): 1-8. (in Chinese)

20 梁振林, 郭战胜, 姜昭阳, 等. “鱼类全生活史”型海洋牧场构建理念与技术. 水产学报, 2020, 44(7): 1211-1222.

Liang Z L, Guo Z S, Jiang Z Y, et al. Construction concept and technology of the marine ranching mode of the whole life history of fishes. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(7): 1211-1222. (in Chinese)

21 陈泳茂, 李晓娟, 傅恩波. 中国未来的渔业模式——建设海洋牧场. 资源开发与市场, 2000, 16(2): 78-79.

Chen Y M, Li X J, Fu E B. The future pattern of fishery in China—Constructing oceanic ranch. Resource Development & Market, 2000, 16(2): 78-79. (in Chinese)

22 丁德文, 索安宁. 关于海洋人工生态系统理论范式的思考. 海洋环境科学, 2021, 40(5): 653-658.

Ding D W, Suo A N. On the theoretical paradigm of marine artificial ecosystem. Marine Environment Science, 2021, 40(5): 653-658. (in Chinese)

23 丁德文, 何培民, 叶属峰, 等. 中国近岸海洋生态学研究与管理. 北京: 科学出版社, 2022.

Ding D W, He P M, Ye S F, et al. Coastal Marine Ecology in China: Research and Management. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)

24 周卫国, 丁德文, 索安宁, 等. 珠江口海洋牧场渔业资源关键功能群遴选方法研究. 水产学报, 2021, 45(3): 433-443.

Zhou W G, Ding D W, Suo A N, et al. Key functional groups selection in marine ranching fishery resources—Take Wanshan islands adjacent sea as an example. Journal of Fisheries in China, 2021, 45(3): 433-443. (in Chinese)

25 陈勇,于长清, 张国胜, 等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果. 大连水产学院学报, 2002, 17(1): 64-69.

Chen Y,Yu C Q, Zhang G S, et al. The environmental function and fish gather effect of artificial reefs. Journal of Dalian Fisheries University, 2002, 17(1): 64-69. (in Chinese)

26 张全国, 张大勇. 生物多样性与生态系统功能：最新的进展与动向. 生物多样性, 2003, 11(5): 351-363.

Zhang Q G, Zhang D Y. Biodiversity and ecosystem functioning: recent advances and trends. Biodiversity Science, 2003,11(5): 351-363. (in Chinese)

27 Zhou W, Xu P, Ding D, et al. Trophic structure of fishes and macroinvertebrates in relation to environmental indicators in artificial reef ecosystems of Pearl River Estuary. Ecological Indicators, 2022, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108823.

28 Zhang R, Zhang H, Liu H, et al. Differences in trophic structure and trophic pathways between artificial reef and natural reef ecosystems along the coast of the North Yellow Sea, China, based on stable isotope analyses. Ecological Indicators, 2021, doi:10.1016/j.ecolind.2021.107476.

29 陈丕茂, 秦传新, 舒黎明. 珠江口人工鱼礁场生态效应. 北京: 中国农业出版社, 2018.
Chen P M, Qin C X, Shu L M. The Ecological Effects of Artificial Reefs in the Pearl River Estuary. Beijing: China Agriculture Press, 2018. (in Chinese)

30 Allen W, Bosch O, Kilvington M, et al. Monitoring and adaptive management: resolving social and organizational issues to improve information sharing in natural resource management// Natural Resources Forum. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2001.

31 Johnson B L. The role of adaptive management as an operational approach for resource management agencies. Conservation Ecology, 1999, 3(2):8-20.

Theoretical Thinking of Artificial Ecosystem for Modern Marine Ranching

DING Dewen　SUO Anning*

（1 CAS Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China）

Abstract　Based on the systematic review of the conceptual evolution process of marine ranching and its development of practice, this paper pointed out the problems existing in the construction of marine ranching in China, such as lack of theoretical support, lack of ecological engineering technologies, and lack of ecological management. It then proposed the concept of marine ranching artificial ecosystem. In addition, the paper analyzed the structural principle of marine ranching artificial ecosystem from the viewpoint of cultivating key functional communities and habitat construction for the marine ranch fishery resources. Finally, the paper discussed the theoretical framework of the modern marine ranching artificial ecosystem, including the planning and design, the construction of ecological engineering and intelligent engineering, and the establishment of adaptive management, aiming to explore the ecological theory system for China's modern marine ranching construction.

Keywords　modern marine ranching, artificial ecosystem, theoretical framework, key functional community, habitats creation



丁德文　中国工程院院士。农业农村部海洋牧场生态系统研究工作站负责人，自然资源部第一海洋研究所学术委员会主任，海洋生态环境科学与工程国家海洋局重点实验室主任。海洋生态-环境科学与工程专家，先后参加或主持省部级以上基础和技术科学及重大工程实施等科学研究20余项，获省部级以上自然科学、科技进步奖12项，在国内外公开发表论文100余篇，出版专著（编、译）6部。E-mail: dingdewen@scsio.ac.cn

DING Dewen　Academician of Chinese Academy of Engineering. Professor Ding is a famous expert in marine ecology & environment science and engineering in China. He is also the Director of Marine Ranch Ecosystem Research Workstation of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. He has been focusing on the research of marine ecology and marine artificial ecosystem in marine ranching, marine ecological restoration, etc. In addition to receiving 12 scientific and technological awards at the national and provincial levels, he has published over 100 research papers internationally as well as 6 monographs. E-mail: dingdewen@scsio.ac.cn

*Corresponding author



索安宁　中国科学院南海海洋研究所研究员。中国太平洋学会生态环境分会副会长，中国水产学会海洋牧场专委会理事，国家级海域使用论证评审专家库专家，广东省国土生态修复协会专家暨海洋生态修复专委会秘书长。主要从事海洋生态系统、海岸带景观生态学，海岸带资源环境监测评估等方面科学研究工作。研究成果获海洋工程科学技术奖一等奖1项、二等奖2项，海洋科学技术奖二等奖2项，浙江省科技进步二等奖1项。发表各类学术论文110多篇，出版著作10部，授权专利5项。E-mail: suoanning@scsio.ac.cn

SUO Anning　Professor at South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is also Vice President of Marine Ecological Monitoring Branch, Pacific Society of China, and Secretary General of Marine Ecological Restoration Professional Committee, Guangdong Land and Marine Space Ecological Restoration Association. He has been focusing on the research in marine ecosystem ecology, coastal landscape ecology and coastal restoration remote sensing monitoring and macro-ecological assessment, etc. He has been awarded the first prize in marine engineering technology once, second prize in marine engineering technology twice, and second prize in marine science and technology twice. He has published more than 110 papers and 10 books.
E-mail: suoanning@scsio.ac.cn

■责任编辑：文彦杰